

Study on Coupling Behavior of Keyhole Flow and Keyhole Wall in Deep Penetration Laser Welding

Shichun Li^{1,2*}, Wei Xu^{1,2}, Shenghui Liao³, Genyu Chen⁴

¹Intelligent Manufacturing Institute of HNUST, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

²Hunan Provincial Key Laboratory of High Efficiency and Precision Machining of Difficult-to-Cut Material, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

³Xiamen King Long United Automotive Industry Co, Ltd., Xiamen Fujian

⁴Laser Research Institute, Hunan University, Changsha Hunan

Email: *li.shi.chun@163.com

Received: Oct. 28th, 2017; accepted: Nov. 10th, 2017; published: Nov. 15th, 2017

Abstract

The hydrodynamic coupling behavior of gas-liquid interaction between the metal vapor in the keyhole and the keyhole wall during deep penetration laser welding determines the welding stability and affects the final welding quality. In this paper, stainless steel sheet metal and glass were clamped to make a dissimilar materials butt joint, and then the deep penetration laser welding of dissimilar materials was achieved. A high-speed camera was used to observe the characteristics of keyhole and the fluctuation of the keyhole wall from the glass side. The interaction behaviors between the vapor and the keyhole wall under different welding conditions were analyzed. The results showed that the effect of the vapor flow in the keyhole caused the keyhole wall to form a moving wave, which was accompanied by the formation of splash and liquid column when the moving wave crushed at the opening of the keyhole. During low speed welding process, the keyhole was deep, the keyhole vapor was fluctuating, and the keyhole wall was fluctuating frequently. The variation of laser beam defocusing distance effected the keyhole diameter and the laser energy distribution in the keyhole, and resulted in the change of the pressure and velocity of the vapor flow in the keyhole, thus changed the effect of the metal vapor on the hole wall in the keyhole. In deep penetration laser welding, the liquid metal on the rear keyhole wall was mainly moving upwards, which was driven by the gasification recoil pressure and vapor flow, and only a small part of the molten metal closing to the bottom of the keyhole was moving downwards.

Keywords

Deep Penetration Laser Welding, Metal Vapor, Keyhole Shape, Coupling Behavior

*通讯作者。

高功率激光深熔焊接孔内气流与孔壁的耦合行为研究

李时春^{1,2*}, 许伟^{1,2}, 廖生慧³, 陈根余⁴

¹湖南科技大学智能制造研究院, 湖南 湘潭

²湖南科技大学难加工材料高效精密加工湖南省重点实验室, 湖南 湘潭

³厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建 厦门

⁴湖南大学机械与运载工程学院激光研究所, 湖南 长沙

Email: ^{*}li.shi.chun@163.com

收稿日期: 2017年10月28日; 录用日期: 2017年11月10日; 发布日期: 2017年11月15日

摘要

激光深熔焊接过程中深熔小孔内金属蒸气与焊接熔池孔壁之间存在直接相互作用的气液流体动力学耦合行为, 决定着焊接稳定性并影响最终的焊接质量。本文将不锈钢金属板材与玻璃组合夹紧制成异种材料对接接头, 实现异种材料的激光深熔焊接。采用高速相机从玻璃一侧对小孔形态和孔壁波动特征进行观察研究, 分析了不同焊接条件下蒸气与孔壁的相互力学耦合作用及其产生的规律。结果显示孔内蒸气流的作用促使小孔壁形成移动波, 移动波在小孔开口处破碎时伴随着飞溅和液柱的形成。低速焊接时, 小孔深、孔内蒸气波动大, 后沿孔壁波动频繁。激光束离焦量的变化, 使得小孔直径和孔内激光能量分布发生变化, 导致孔内蒸气流的压力和流速发生变化, 从而改变了孔内金属蒸气对孔壁的作用大小。熔透激光深熔焊接时, 在气化反冲压力和蒸气流驱动下, 后沿孔壁上的液态金属主要为向上流, 只有接近孔底的小部分金属熔液向下流。

关键词

激光深熔焊接, 金属蒸气, 小孔形态, 耦合行为

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

激光深熔焊接过程的重要特征是焊接过程中形成了深熔小孔。深熔小孔内充满了金属蒸气和金属等离子体, 二者的混合气态与焊接熔池孔壁之间存在直接相互作用的气液流体动力学耦合行为。此气液耦合动力学行为的结果表现为小孔内外的金属蒸气的频繁波动和小孔形状的频繁波动, 并直接影响焊接稳定性和焊接质量[1]。有文献通过高速摄像拍摄观察了激光焊接过程金属蒸气喷出与小孔行为, 结果显示喷出金属蒸气流与后沿熔池存在相互挤压关系, 蒸气对熔池的挤压导致熔池表面的隆起, 熔池对蒸气的挤压导致蒸气喷射方向的波动[2] [3]。另有文献[4] [5]通过观察分析得出, 激光深熔焊接时飞溅的产生主要是因为喷出的蒸气流具有较大的剪切作用力, 小孔开口处的熔池被喷出的蒸气流带出孔外形成飞溅。

多数文献观察分析了金属蒸气喷出孔外时的现象,认为蒸气流对小孔周边熔池流动具有加速作用[3] [6]。对孔内蒸气流的试验观察研究发现[7],小孔前沿孔壁上激光照射导致的气化反冲压力可驱使熔池流动、导致飞溅和驼峰的形成。对于孔内金属蒸气流与孔壁的相互作用没有开展更广泛系统的研究。作者早期研究已对激光照射导致材料气化特征、金属蒸气流动特征、以及金属蒸气力学特征进行分析研究,得出金属蒸气流可对熔池壁产生一定冲击[8] [9] [10] [11] [12]。然而,其具体作用形式及特征还有待进一步研究。为此,本文对激光深熔焊接小孔形态、气流与熔池孔壁间的相互耦合作用进行试验研究,观察了不同焊接参数下小孔形态的变化及熔透激光深熔焊接时的蒸气与熔池流动状态,分析了焊接速度变化、离焦量等参数对金属蒸气与孔壁耦合行为的影响,总结了不同焊接条件下蒸气与孔壁的相互力学耦合作用及其产生的规律。

2. 试验方法

观察深熔小孔的试验方法为:将不锈钢金属材料与 GG17 玻璃组合夹紧,制成异种材料的对接接头形式的焊接试件,激光沿靠近玻璃一侧的不锈钢边缘表面上扫描,在玻璃与不锈钢对接处形成玻璃与不锈钢混合焊接熔池,实现激光深熔焊接。采用高速相机从玻璃一侧观察拍摄深熔小孔,观察研究不同焊接参数下小孔形态的变化、以及孔内气流与孔壁间的相互作用而产生不同的孔壁形态特征。焊接试验示意图如图 1 所示。

试验采用万瓦级光纤激光器 YLS-10000 型号光纤激光器,激光器额定输出功率为 10.0 kW,发射激光波长为 1.07 μm ,聚焦光斑直径为 0.40 mm。试验中采用 CMOS 黑白高速相机对激光深熔焊接过程进行高速摄像观察,选用的拍摄频率为 5000 帧/秒。在拍摄熔池流动时,为了消除焊接时金属蒸气和等离子体的辐射光的影响,采用半导体激光器(其工作波长为 $808 \pm 3 \text{ nm}$,输出功率为 0~40 W 可调)作为辅助光源对拍摄区域进行照亮,同时在相机前放置一特殊窄带滤光片,其可通过的中心波长即为辅助光源工作波长 808 nm。试验中,分别从斜上方观察了玻璃与不锈钢的混合熔池、以及侧面的小孔形态。

试验中,采用 $40 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$ 的 304 不锈钢与 $40 \times 40 \times 6 \text{ mm}^3$ 的 GG17 玻璃组合成对接试件进行激光深熔焊接试验。试验中,激光功率固定设置为 10 kW,对比了未熔透时焊接速度、离焦量对焊接小孔形态的影响规律,并对比分析了熔透焊接时小孔形态的变化特征。

3. 结果与讨论

3.1. 激光深熔焊接上表面熔池特征

图 2(a)和图 2(b)所示为激光深熔焊接试验中,从斜上方观察到的玻璃与不锈钢对接形式的上表面熔池与侧面观察到的小孔形态。图中所示,深熔小孔和焊接熔池均不是对称分布于玻璃与不锈钢材料表面上,而是大部分在不锈钢材料一侧。原因有多方面:一是在焊接试验中,激光光斑的照射位置偏向不锈钢材料,只有很少部分照射在玻璃上,更多的激光能量使得不锈钢材料熔化区域更大;二是不锈钢对激光的吸收率高于玻璃对激光的吸收率,部分激光和辐射光可透过玻璃而使得能量有所损失;三是相比玻璃材料,不锈钢材料具有更高的导热率,可在快速激光焊接过程中传递更多的热量而增加材料的熔化量。试验中,正因为小孔形状的不对称性,从玻璃一侧才能观察到最大尺寸的小孔轮廓。如图 2(b)中清晰地显示了小孔的轮廓。

3.2. 焊接速度变化对金属蒸气与孔壁耦合行为的影响

图 3、图 4 和图 5,分别是在焊接速度为 1.5 m/min、2.5 m/min 和 3.5 m/min,激光功率固定为 10 kW,离焦量固定为 0 的条件下,试验观察到的激光深熔焊接小孔内部形态特征。图中可知,随着焊接速度的

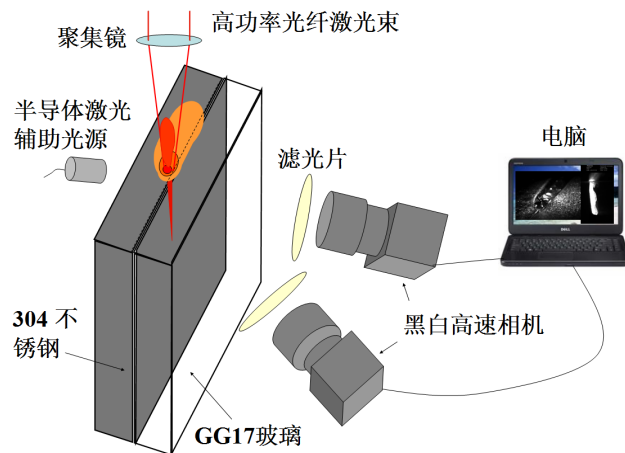


Figure 1. Schematic diagrams of welding keyhole test observation

图 1. 焊接小孔试验观察示意图

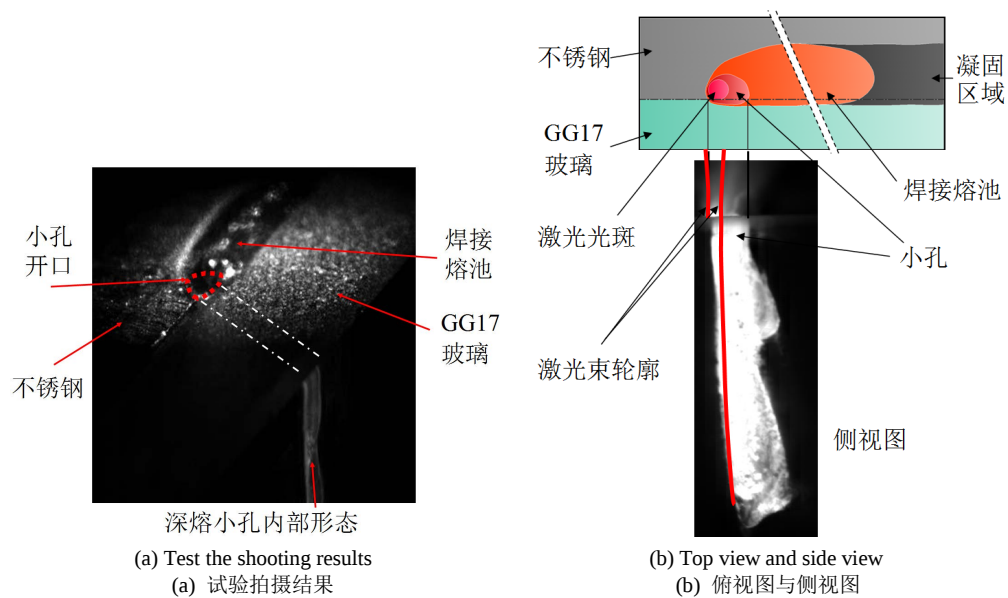


Figure 2. Corresponding relation between surface pool and side keyhole

图 2. 表面熔池与侧面小孔的对应关系

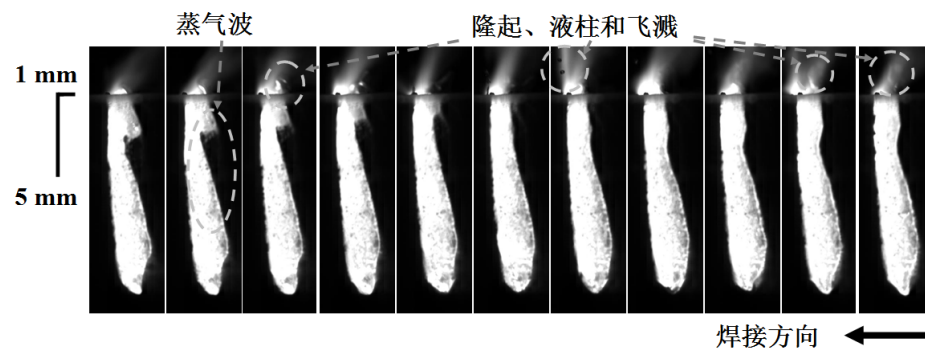


Figure 3. Photographic results at welding speed of 1.5 m/min (Photo interval 0.6 ms)

图 3. 焊接速度为 1.5 m/min 时的拍摄结果(照片间隔时间 0.6 ms)

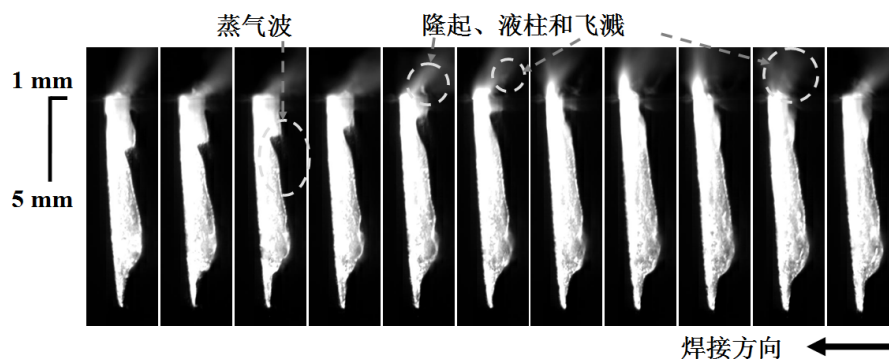


Figure 4. Photographic results at welding speed of 2.5 m/min (Photo interval 0.4 ms)

图 4. 焊接速度为 2.5 m/min 时的拍摄结果(照片间隔时间 0.4 ms)

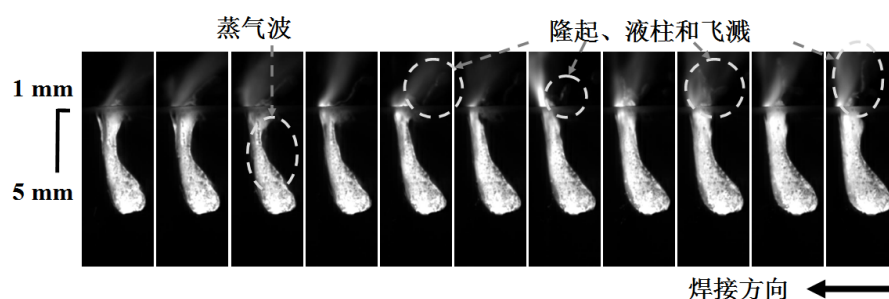


Figure 5. Photographic results at welding speed of 3.5 m/min (Photo interval 0.6 ms)

图 5. 焊接速度为 3.5 m/min 时的拍摄结果(照片间隔时间 0.6 ms)

增加小孔深度逐渐减小(13.5 mm, 11.5 mm, 8 mm)。后沿孔壁上的“蒸气波”在不同焊接速度下出现不同的特征。在孔内金属蒸气和气化反冲压力作用下,熔池孔壁形成了图中所示的“蒸气波”,即因蒸气流动而使熔池形成类似移动波一样特征。试验观察结果显示,在低速焊接时,后沿孔壁波动较大,“蒸气波”出现的频率较高。可见,低速焊接时,由于输入的激光能量大,激光焊接深熔小孔内气化更激烈,孔内气流波动更激烈,所以导致由蒸气波动引起的孔壁形变更加频繁,“蒸气波”更易产生。此外,在低速焊接时还观察到,当“蒸气波”到达小孔出口时,孔壁前沿也产生了飞溅,如图 3 所示。原因是,低速焊接时,前沿孔壁上熔融金属层较厚,“蒸气波”到达孔顶时,小孔出口尺寸变小,产生局部压力增加,随着蒸气的喷出,前沿孔壁熔液被驱动向上流形成飞溅。相比之下,前沿孔壁上产生的飞溅尺寸要小于后沿熔池产生的飞溅尺寸。当焊接速度为 3.5 m/min 时,后沿孔壁上通常只出现单个“蒸气波”,如图 5 所示。随着高速焊接时“蒸气波”向孔外移动,在孔外形成较长的液柱和飞溅。主要原因之一是,高速焊时,前沿孔壁倾斜角度增加,在接近小孔出口处前沿孔壁上的材料气化形成的反冲压力具有斜向上的作用方向,可对熔池产生挤压作用而产生较长、倾斜角度较大的液柱和飞溅。

3.3. 离焦量变化对金属蒸气与孔壁耦合行为的影响

图 6、图 7 和图 8,分别是在离焦量为+5 mm、0 mm 和-10 mm,激光功率固定为 10 kW,焊接速度固定为 1.8 m/min 的条件下,试验观察到的激光深熔焊接小孔内部形态特征。图 6 显示,正离焦时的孔深相对有所减小,而小孔开口处直径却相对较大。在深熔小孔底部,后沿孔壁易产生形成“蒸气波”。但是“蒸气波”向上移动的速度很低,且在向上移动过程中波形逐渐消失。可见,正离焦时小孔底部产生的材料气化形成的蒸气流波动较大,孔底处易产生“蒸气波”;但由于深熔小孔的上部径向尺寸较大,孔底向上流的蒸气压力有所减小,蒸气对后沿孔壁的剪切摩擦作用相对更小尺寸的孔径时有所减小,所

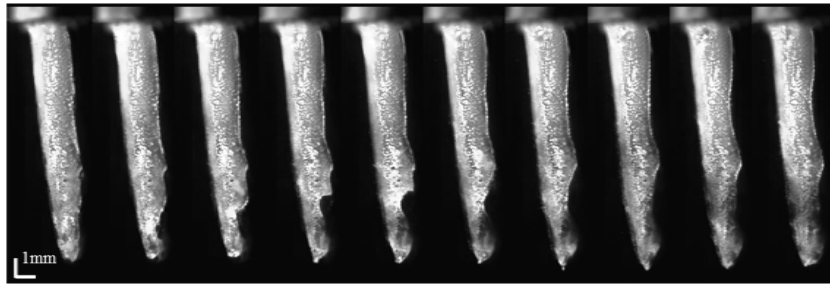


Figure 6. Photographic results at defocusing amount to +5 mm (Photo interval 0.6 ms)

图 6. 离焦量为+5 mm 时的拍摄结果(照片间隔时间 0.6 ms)

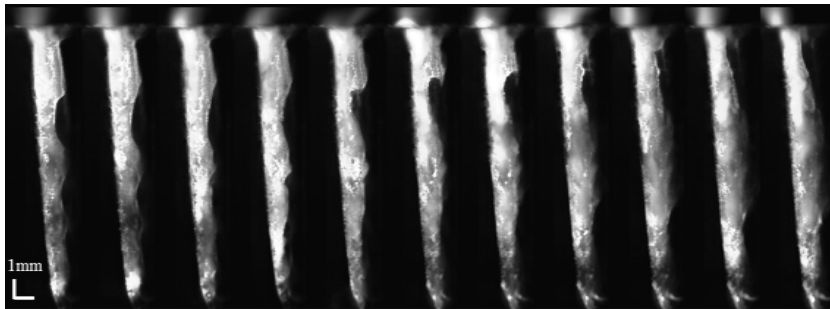


Figure 7. Photographic results at defocusing amount to 0 mm (Photo interval 0.6 ms)

图 7. 离焦量为 0 时的拍摄结果(照片间隔时间 0.6 ms)

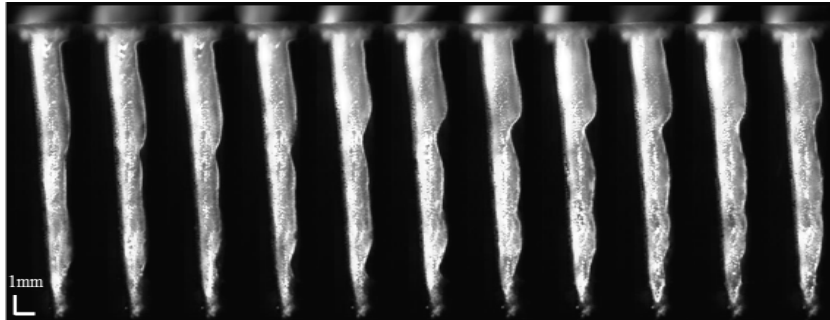


Figure 8. Photographic results at defocusing amount to -10 mm (Photo interval 0.6 ms)

图 8. 离焦量为-10 mm 时的拍摄结果(照片间隔时间 0.6 ms)

有导致在孔底产生的“蒸气波”不能迅速向上移动。图 7 显示, 0 离焦激光深熔焊接时, 小孔深且细, 后沿孔壁波动频繁, “蒸气波”可产生与小孔底部和中部。图 7 中所示中部产生的“蒸气波”可迅速移向孔顶而形成熔池隆起和飞溅。图 8 所示, 负离焦激光深熔焊接时, 同样观察到金属“蒸气波”可产生于小孔底部和小孔中部, 但是其呈现出缓慢向上移动的特征。即相对于 0 离焦激光焊接, 负离焦焊接时后沿孔壁激烈程度相对较小。分析其中原因是: 0 离焦时接近小孔出口处能量密度高, 气化压力大可将“蒸气波”迅速推出孔外; 而负离焦时, 焦点在孔内, 小孔底部能量密度高, 所有在小孔中下部孔壁波动大, 但小孔上部气化蒸气压力小, “蒸气波”移动速度慢。可见, 激光能量密度在小孔内的分布与孔壁波动和“蒸气波”动关系密切, 影响着焊接熔池及小孔状态。

此外, 以上结果显示, 不管离焦量如何变化, 在小孔底部总是较容易产生“蒸气波”。这是因为小孔前沿壁上出现的凸起通常向下流向孔底[9], 在孔底处易出现气流回旋, 孔底蒸气流对孔壁的冲击以及孔底蒸气压力波动, 使得孔底后沿孔壁更容易产生形变出现“蒸气波”。此外多次反射激光可在小孔底

部聚集, 因此孔底处可具有较高激光能量, 其产生的局部气化相对激烈, 气化压力对孔壁影响更大, 导致孔壁波动形变[11]。

3.4. 熔透激光深熔焊接时的蒸气与熔池流动状态

如图 9 所示, 是在激光功率为 10 kW, 离焦量为 0 mm, 焊接速度为 2 m/min 的条件下, 实现激光熔透焊接 10 mm 厚的 GG17 玻璃与不锈钢组合对接试件的过程中, 观察到的激光深熔焊接小孔内部形态特征。试验中观察到后沿孔壁波动频繁, 易产生多个“蒸气波”。虽然金属蒸气可同时从表面小孔开口和底部小孔开口喷出, 但是观察结果显示, 后沿孔壁上的“蒸气波”主要是向上移动。如图 9 所示虚线, 只有在接近底部小孔出口时的小范围内的后沿孔壁上的熔液向下移动形成飞溅。

此外, 本文高速相机观察结果与文献中同样条件下采用 X 射线透射观察到的小孔形态对比, 如图 10 所示[8]。图中可知本文采用玻璃透光观察的焊接小孔波动特征与采用 X 射线投过金属材料观察到的材料内部的焊接小孔波动特征类似, 证实本文的观察结果能够反映真实的焊接过程。且采用本文观察到的深熔焊接小孔形态和变化过程更加清晰。

上述熔透焊接时, 导致大部分金属熔液向上移动的关键因素是深熔小孔内反冲压力。如图 11 所示, 当激光照射在前沿孔壁上, 由于前沿孔壁本身具有一定倾斜角度, 孔壁上材料气化产生的气化反冲力的方向呈现出斜向上的特征。并且, 在激光深熔焊接过程中前沿孔壁上总是不断产生微小凸起, 在凸起表面产生的材料气化反冲力同样为斜向上的。这种斜向上的气化反冲力, 使得小孔内大部分蒸气流的方向为向上流动。在斜向上的气化反冲力和总体向上流的蒸气作用下, 后沿孔壁上产生的“蒸气波”被逐渐推向小孔上部, 最后在熔池表面形成隆起、液柱和飞溅。因此, 试验观察到后沿孔壁上的熔液和“蒸气波”主要为向上流。而在孔底处, 由于孔内与下表面孔外的压力差, 接近孔底的金属蒸气喷出的同时对周边熔池产生挤压, 使得接近孔底部分熔池向下流形成底部飞溅。

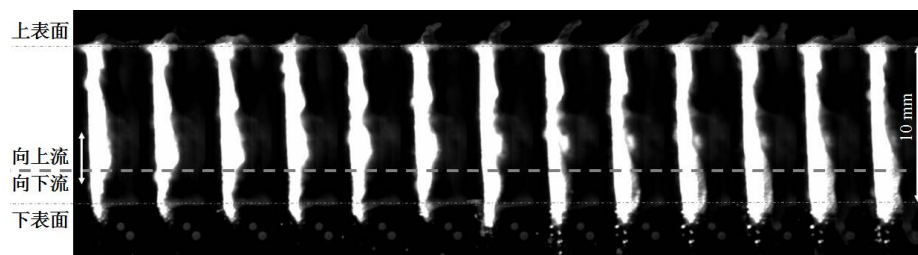


Figure 9. Photographic results at penetrated welding (Photo interval 0.6 ms)

图 9. 熔透焊接时的拍摄结果(照片间隔时间 0.6 ms)

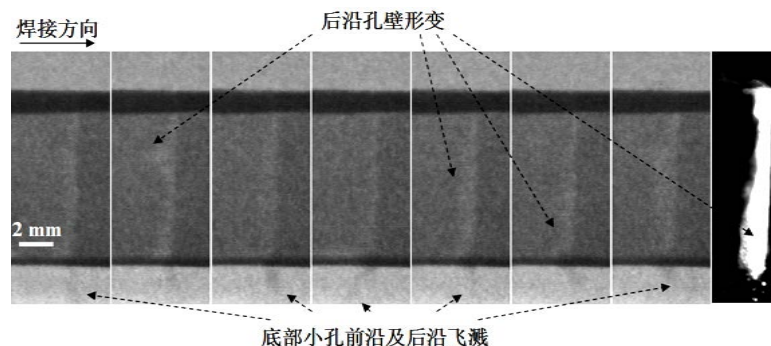


Figure 10. X-ray transmission observation of the keyhole shape during penetrated welding (Photo interval 8 ms)

图 10. X 射线透射观察的熔透焊接时小孔形态(照片间隔时间 8 ms)

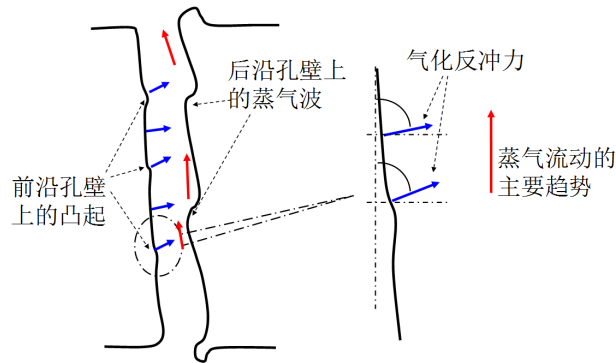


Figure 11. The frontal keyhole wall gasification and the direction of vapor flow

图 11. 前沿孔壁气化与蒸气流的方向

4. 结论

本文对激光深熔焊接小孔形态、孔壁波动特征进行了观察研究，分析了不同焊接条件下蒸气与孔壁的相互力学耦合作用及其产生的规律，得到以下主要结论：

1) 较低速焊接过程中，孔内蒸气波动较大，导致后沿孔壁波动频繁。而高速焊接时，由于小孔深度较浅，且高速焊小孔前沿倾角大，前沿孔壁上材料气化的反冲力可对后沿熔池产生挤压作用，形成斜向后方移动的液柱和飞溅。

2) 在 0 离焦激光焊接时，后沿孔壁波动频繁，易产生“蒸气波”，且“蒸气波”可迅速移向小孔出口，形成隆起和飞溅。而在正离焦和负离焦时，后沿孔壁同样存在波动且产生了“蒸气波”，但是其并没有迅速移向孔外形成飞溅。其原因与小孔尺寸有关系，但更重要的是离焦量的变化改变了激光能量在孔内的分布，从而改变了孔内金属蒸气对孔壁的作用大小。

3) 熔透激光深熔焊接试验中观察到，后沿孔壁上形成的“蒸气波”主要为向上流，只有接近孔底的小部分熔池会在底部蒸气喷出时，被挤压而向下流。其中倾斜前沿孔壁上的材料气化反冲压力是驱动孔内蒸气流和“蒸气波”向上移动的关键因素。

基金项目

国家自然科学基金(批准号：51505145)。

参考文献 (References)

- [1] 邹江林, 李飞, 牛建强, 等. 高功率光纤激光焊接羽辉对焊接过程的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 1-5.
- [2] Fabbro, R., Slimani, S., Doudet, I., et al. (2006) Experimental Study of the Dynamical Coupling between the Induced Vapour Plume and the Melt Pool for Nd-Yag CW Laser Welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **39**, 394-400. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/2/023>
- [3] Fabbro, R. (2010) Melt Pool And Keyhole Behaviour Analysis for Deep Penetration Laser Welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **43**, 445501. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/44/445501>
- [4] Kawahito, Y., Mizutani, M. and Katayama, S. (2007) Elucidation of High-Power Fibre Laser Welding Phenomena of Stainless Steel and Effect of Factors on Weld Geometry. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **40**, 5854-5859. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/19/009>
- [5] Katayama, S. and Kawahito, Y. (2009) Elucidation of Phenomena in High Power Fiber Laser Welding, and Development of Prevention Procedures of Welding Defects. *Proceedings of SPIE*, **146**, 124-126.
- [6] Kaplan, A.F.H., Westin, E.M., Wiklund, G., et al. (2008) Imaging in Cooperation with Modeling of Selected Defect Mechanisms during Fiber Laser Welding of Stainless Steel. *International Congress on Applications of Lasers & Elec-*

tro-optics, **73**, 1861-1875.

- [7] Zhang, M., Chen, G., Zhou, Y., *et al.* (2013) Observation of Spatter Formation Mechanisms in High-Power Fiber Laser Welding of Thick Plate. *Applied Surface Science*, **280**, 868-875. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.05.081>
- [8] 李时春. 万瓦级激光深熔焊接中金属蒸气与熔池耦合行为研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [9] Li, S., Chen, G., Zhang, M., *et al.* (2014) Dynamic Keyhole Profile during High-Power Deep-Penetration Laser Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, **214**, 565-570. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.10.019>
- [10] Li, S., Chen, G., Katayama, S., *et al.* (2014) Relationship between Spatter Formation and Dynamic Molten Pool during High-Power Deep-Penetration Laser Welding. *Applied Surface Science*, **303**, 481-488. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.030>
- [11] Li, S., Chen, G., Katayama, S., *et al.* (2014) Experimental Study of Phenomena and Multiple Reflections during Inclined Laser Irradiating. *Science and Technology of Welding and Joining*, **19**, 82-90. <https://doi.org/10.1179/1362171813Y.0000000169>
- [12] 李时春, 邓辉, 张焱, 等. 高功率激光深熔焊接时喷出金属蒸气动力学行为研究[J]. 应用激光, 2016, 36(4): 403-407.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org